

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.025

CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.025

崔振坤, 于振文, 石玉, 等. 水氮运筹对土壤氮代谢酶活性和小麦氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1):

CUI Zhenkun, YU Zhenwen, SHI Yu, et al. Effects of water and nitrogen management on soil nitrogen metabolism enzyme activity and wheat nitrogen utilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1):

水氮运筹对土壤氮代谢酶活性和小麦氮素利用的影响

崔振坤, 于振文, 石玉, 张永丽, 张振

(小麦育种全国重点实验室, 山东农业大学农学院, 农业农村部作物生理生态与耕作重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: [目的]为探究在测墒补灌条件下, 水氮运筹对土壤氮代谢相关酶活性和小麦氮素利用的影响。[方法]采用二因素裂区设计, 主区在小麦拔节期和开花期, 0~40 cm 土层土壤相对水分体积分数分别补灌至 65% (W1)、75% (W2)、85% (W3); 副区分别设置施纯氮 0 (N0)、150 (N1)、180 (N2)、210 (N3) kg/hm² 4 个施氮量。在 2022—2024 年 2 个小麦生长季, 测定分析土壤氮代谢相关酶活性、植株氮素积累转运、氮素营养指数、硝态氮残留量、籽粒产量和水氮利用效率。[结果]1) 土壤相对水分体积分数补灌至 75% 水平, 协同施氮 180 kg/hm² (W2N2 处理) 能够显著提高小麦开花期土壤脲酶和蛋白酶活性, 降低土壤硝酸还原酶活性, 有利于土壤氮素向作物可吸收形态转化。由方差分析结果可知, 灌溉水平、施氮量及其交互作用对土壤氮代谢酶活性的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$)。W2N2 处理显著减少 60~120 cm 土层土壤硝态氮残留量, 降低土壤氮素淋溶风险。2) W2N2 和 W2N3 处理均能够显著提高小麦营养器官氮素积累量、氮素转运量和籽粒氮素积累量, 同时, 具有最佳的氮素营养指数, 能够满足小麦氮素需求。灌溉水平、施氮量及其交互效应对小麦氮素营养指数、氮素积累和转运的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$)。3) W2N2 处理能够获得最高的籽粒产量, 继续增加水氮投入对小麦产量无显著影响。不同灌溉水平和施氮量对小麦籽粒产量具有显著影响, 且二因素的交互作用达到极显著水平 ($p < 0.01$), 灌溉水平和施氮量对籽粒产量的决定系数分别为 0.313、0.485。4) W2N2 处理具有较高的水氮利用效率, 继续提高灌溉水平和施氮量, 易造成小麦水氮利用效率的显著降低。灌溉水平、施氮量及其交互效应对小麦水氮利用效率的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$)。相较于 W2N2 处理, W2N3、W3N2 和 W3N3 处理氮肥农学效率 2 年平均降低 13.02%~26.34%, 氮肥利用率降低 9.77%~23.64%, 灌溉水利用效率降低 2.88%~38.10%。[结论]小麦拔节期和开花期 0~40 cm 土层土壤相对水分体积分数均分别补灌至 75%, 协同施氮 180 kg/hm² 能够显著提高小麦籽粒产量、水氮利用效率、营养器官氮素积累与转运量和籽粒氮素积累量; 同时, 具有最佳的土壤氮代谢酶活性和氮素营养指数, 是黄淮海地区小麦高产高效的最优水氮运筹方式。

关键词: 小麦; 水氮运筹; 测墒补灌; 土壤酶活性; 氮素利用

中图分类号: S154.4; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0000-00

Effects of Water and Nitrogen Management on Soil Nitrogen Metabolism Enzyme Activity and Wheat Nitrogen Utilization

CUI Zhenkun, YU Zhenwen, SHI Yu, ZHANG Yongli, ZHANG Zhen

(State Key Laboratory of Wheat Improvement, College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Farming, ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of water and nitrogen management on soil nitrogen metabolism enzyme activity and wheat nitrogen utilization under irrigation based on soil moisture. [Methods] The experiment adopted a two-factor split zone design, and the main plot was three irrigation levels, i. e. the relative water content of the 0~40 cm soil layer at jointing and anthesis stages of wheat was supplemented to 65% (W1), 75% (W2) and 85% (W3). The subplot was four nitrogen application rates, i. e. pure nitrogen

收稿日期: 2024-08-04

修回日期: 2024-09-04

录用日期: 2024-10-15

网络首发日期 (www.cnki.net):

资助项目: 国家自然科学基金项目 (32172114); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-03-18); 泰山学者工程专项 (202211094)

第一作者: 崔振坤 (2000—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事小麦高产高效生理生态研究。E-mail: cuizhenkunxiaomai@163.com

通信作者: 石玉 (1979—), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事小麦高产高效生理生态研究。E-mail: shiyu@sdaa.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

0 (N0), 150 (N1), 180 (N2) and 210 (N3) kg/hm². Soil nitrogen metabolism enzyme activity, nitrogen accumulation and translocation, nitrogen nutrition index (NNI), residual amount of nitrate-nitrogen, grain yield, water-and nitrogen-use efficiencies were measured and analyzed in two wheat growing seasons from 2022 to 2024. **[Results]** 1) Supplementing irrigation to 75% and applying 180 kg/hm² nitrogen (W2N2 treatment) could significantly improve the activities of soil urease and protease, reduce the activity of soil nitrate reductase, facilitated the transformation of soil nitrogen into crop absorbable forms. According to the results of variance analysis, the effects of irrigation level, nitrogen application rate and their interaction on soil nitrogen metabolism enzyme activity reached a very significant level ($p < 0.01$). In addition, W2N2 treatment significantly reduced the residual amount of nitrate-nitrogen in the 60—120 cm soil layer, and reduced the risk of soil nitrogen leaching. 2) Both W2N2 and W2N3 treatments could significantly increase nitrogen accumulation in vegetative organs, nitrogen translocation and grain nitrogen accumulation, and had the best NNI, which could meet the nitrogen requirements of wheat. The effects of irrigation level, nitrogen application rate and their interaction on NNI, nitrogen accumulation and transport of wheat reached a significant level ($p < 0.01$). 3) The highest grain yield could be obtained by W2N2 treatment, while further increasing water and nitrogen input had no significant effect on grain yield. Different irrigation levels and nitrogen application rates had significant effects on grain yield, and the interaction between the two factors reached a very significant level ($p < 0.01$). The decision coefficient of irrigation level and nitrogen application rate on grain yield was 0.313 and 0.485, respectively. 4) W2N2 treatment had high water-and nitrogen-use efficiencies, that would be easy to cause a significant decrease under continuous improvement of irrigation level and nitrogen application rate. The effects of irrigation level, nitrogen application rate and their interaction on water-and nitrogen-use efficiencies of wheat reached a significant level ($p < 0.01$). Compared with W2N2 treatment, the two-year average nitrogen fertilizer agronomic efficiencies of W2N3, W3N2 and W3N3 treatment were reduced by 13.02% to 26.34%, the nitrogen utilization rates were reduced by 9.77% to 23.64%, and the irrigation water use efficiencies were reduced by 2.88% to 38.10%. **[Conclusion]** The soil relative water content of the 0~40 cm soil layer at the jointing and anthesis stages of wheat supplemented to 75%, and nitrogen applied at 180 kg/hm² can significantly improve wheat grain yield, water-and nitrogen-use efficiencies, nitrogen accumulation, nitrogen translocation in vegetative organs and grain nitrogen accumulation, and have the best soil nitrogen metabolism enzyme activity and NNI. It is the optimal water and nitrogen management for wheat with high yield and high efficiency in the Huang-Huai-Hai region.

Keywords: wheat; water and nitrogen application; supplemental irrigation based on soil moisture measurement; soil enzyme activity; nitrogen utilization

Received: 2024-08-04

Revised: 2024-09-04

Accepted: 2024-10-15

Online(www.cnki.net):

黄淮海地区是我国重要的小麦主产区,该区小麦的高产稳产对于保障国家粮食安全具有重要意义^[1]。补充灌溉和施用化肥是确保该区小麦高产稳产的重要栽培措施。近年来,农民为获得高产往往过量投入水氮资源,采用“大肥大水”的管理措施^[2]。该管理方式易造成水肥利用率降低、土壤氮素淋溶加剧和土壤肥力下降等状况,并引发一系列的环境污染问题,不利于土壤-作物系统的可持续发展^[3]。该区水资源占比不足全国的8%,水资源紧缺,过量的水氮投入进一步加剧该地区的资源矛盾^[4]。因此,优化水氮运筹是缓解黄淮海地区资源矛盾和减少环境污染问题的重要措施。

补充灌溉对小麦植株的氮素吸收能力、植株氮素积累和转运均具有显著影响。过量灌溉造成植株氮素积累量减少、土壤氮素淋溶加剧和氮肥利用率降低等问题,而过度亏缺灌溉导致作物的吸收能力显著下降、植株氮素积累量减少和土壤氮代谢能力减弱^[5]。根据小麦需水特性,按需进行补充灌溉可实现小麦高产和氮肥高效^[6]。适宜的氮肥投入能够有效提高小麦营养器官氮素积累量,促进氮素转运,进而提高籽粒氮素积累量^[7]。但小麦生产中的氮肥投入量远超小麦生长需求,造成土壤氮素大量损失,显著降低氮肥利用率,且对籽粒产量和氮素积累量无显著增加作

用^[8]。前人^[9]研究表明,水氮因素对土壤氮素积累量和小麦植株氮素积累转运等方面具有显著的互作效应,适宜的水氮运筹可显著增加小麦产量和籽粒氮素积累,同时,能够有效降低土壤氮素损失,提高水氮利用效率。目前,多采用定量灌溉方式进行水氮运筹的研究,而基于土壤墒情和小麦需水特性的测墒补灌方式,水氮运筹对土壤氮代谢酶活性和小麦氮素利用情况的影响尚不明确。因此,本研究基于测墒补灌技术,研究不同水氮运筹方式对土壤氮代谢相关酶活性、植株氮素利用情况、硝态氮残留量和水氮利用效

率的影响,为协同提高小麦产量和水氮利用效率,缓解黄淮海地区资源矛盾提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2022 年 10 月至 2024 年 6 月在山东省济宁市兖州区小麦试验站进行(35°40'N,116°24'E)。该地区属温带大陆性季风气候,小麦生长季降水较少,生产中需要补充灌溉。土壤类型为潮土,播种前玉米秸秆全部还田,养分质量分数见表 1,小麦生育期内降水量和气温月变化见图 1。

表 1 小麦播种前 0~20 cm 土层土壤养分质量分数

年份	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
2022—2023	14.28	1.14	120.41	26.59	117.27
2023—2024	14.21	1.12	118.25	28.93	119.49

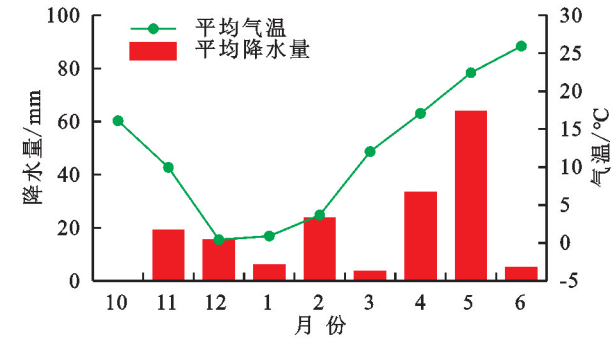


图 1 2022—2024 年小麦生长季降水量和气温月变化
Fig.1 Monthly variations of precipitation and temperature in wheat growing season

1.2 试验设计

本试验采用二因素裂区设计,主区为灌溉水平,副区为施氮量。在小麦拔节期和开花期,将 0~40 cm 土层土壤相对水分体积分数补灌至 65%(W1)、75%(W2)和 85%(W3)3 个灌溉水平;设置不施氮(N0)、施纯氮 150(N1)、180(N2)和 210(N3)kg/hm² 4 个施氮量。各裂区面积为 2 m×15 m,采用随机区组排列,重复 3 次,小区间设 2 m 保护行。供试肥料分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)和硫酸钾(含 K₂O 52%)。播种前施 P₂O₅ 和 K₂O 各 150 kg/hm²,氮肥分播前基施和拔节期追施 2 次施用,基追比例为 5:5。灌溉采用测墒补灌方式进行,分别在小麦拔节期和开花期使用微喷带灌溉并用水表计量,各处理施氮量和灌水量见表 2。供试品种为“济麦 22”,播种时间分别为 2022 年 10 月 15 日和 2023 年 10 月 11 日,播种密度均为 180 万株/hm²,收获时间分别为 2023 年 6 月 11 日和 2024 年 6 月 10 日。

1.3 测定项目与方法

1)灌水量。灌水量的计算公式^[6]为:

$$M=10\times r\times H\times(\beta_i-\beta_j)$$

式中:M 为补灌水量,mm;r 为计划湿润土层的土壤体积质量,g/cm³;H 为计划湿润土层深度,cm;β_i 为目标土壤水分质量分数,g/kg;β_j 为灌溉前土壤水平分质量分数,g/kg。

表 2 各试验处理施氮量和灌水量

Table 2 Nitrogen application rate and irrigation amount of each treatment

主处理	副处理	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	灌水量/mm	
			2022—2023 年	2023—2024 年
W1	N0	0	41.95	81.79
	N1	150	40.80	79.15
	N2	180	44.56	81.29
	N3	210	48.22	84.64
W2	N0	0	70.11	104.62
	N1	150	68.35	103.43
	N2	180	71.86	106.37
	N3	210	76.54	107.88
W3	N0	0	95.49	130.42
	N1	150	95.79	128.91
	N2	180	100.49	132.28
	N3	210	104.44	133.35

2)土壤氮代谢酶活性。于小麦开花期采集 0~20 cm 土层土壤样品,风干后过 1 mm 筛。土壤脲酶、蛋白酶和硝酸还原酶活性分别采用次氯酸钠-苯酚钠比色法、茚三酮比色法和酚二磺酸比色法^[10]测定。

3)土壤硝态氮积累量。于小麦成熟期分 10 层采集 0~200 cm 土层土壤样品,每 20 cm 为 1 层。采用 AA3 型连续流动分析仪(德国)测定土壤硝态氮质量分数。

$$\text{土壤硝态氮积累量}=\text{土层厚度}\times\text{土壤体积质量}\times\text{土壤硝态氮质量分数}/10$$

4) 植株氮素积累与转运。于小麦开花期和成熟期取 20 个单茎, 重复 3 次。105 °C 杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒重, 采用凯氏定氮法测定样品全氮质量分数。

植株氮素积累量 = 干物质积累量 × 植株含氮量

营养器官氮素转运量 = 开花期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量

营养器官氮素对籽粒贡献率 = 营养器官氮素转运量 / 籽粒氮素积累量 × 100

5) 水氮利用效率和氮素营养指数。水氮利用效率和氮素营养指数的计算公式为:

灌溉水利用效率 = 籽粒产量 / 灌水量

氮肥农学效率 = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量

氮肥利用率 = (施氮区籽粒氮素积累量 - 不施氮区籽粒氮素积累量) / 施氮量

标准氮量 = 植株最小氮质量分数 × 植株干物质质量^{-0.44}

氮素营养指数 = 地上部实际吸收的氮量 / 标准氮量^[11]

6) 籽粒产量。于小麦成熟期各小区内随机选 3 m², 自然风干至水分体积分数为 12.5%, 测定籽粒产量。

1.4 数据处理

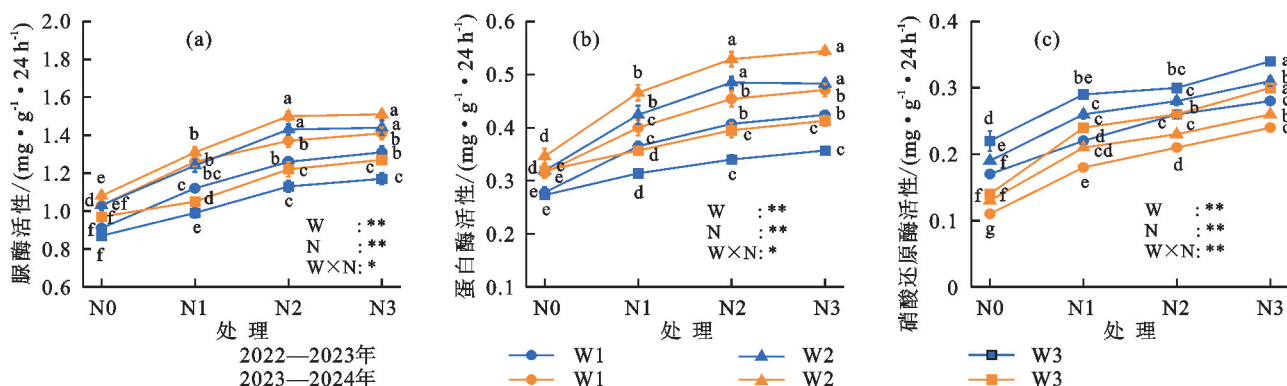
采用 Excel 2021 和 SPSS 26 软件进行数据分析, Origin 2021 软件制图, 方差分析和显著性检验采用二因

素方差分析(two-factor analysis of variance)和邓肯氏新复极差法(duncan's multiple range test)进行。

2 结果与分析

2.1 水氮运筹对小麦开花期土壤氮代谢相关酶活性的影响

由图 2 可知, 灌溉水平和施氮量对小麦开花期土壤氮代谢相关酶活性影响显著, 且水氮互作效应均达到显著水平($p < 0.05$)。在 2022—2024 年 2 个小麦生长季, 同一灌溉水平下, 小麦开花期 0~20 cm 土层土壤酶活性均表现为随施氮量增加呈增加趋势。相同施氮量条件下, 土壤脲酶和蛋白酶活性均表现为 $W2 > W1 > W3$, 硝酸还原酶活性表现为 $W3 > W2 > W1$ 。相较于 $W3N2$ 和 $W3N3$ 处理, $W2N2$ 处理土壤脲酶活性 2 年平均分别显著提高 24.68% 和 20.08%, 蛋白酶活性分别提高 37.96% 和 31.69%, 硝酸还原酶活性分别降低 9.80% 和 25.49%。与 $W2N3$ 处理相比, $W2N2$ 处理土壤脲酶和蛋白酶无显著差异, 但显著降低硝酸还原酶活性。表明 $W2N2$ 处理显著提高土壤脲酶和蛋白酶活性, 降低硝酸还原酶活性, 有利于土壤有机态氮向无机态氮的转化, 并减少无机态氮损失。继续增加灌溉水平和施氮量对小麦开花期土壤氮代谢相关酶活性造成显著的不利影响。



注: 不同字母表示同一生长季不同处理间差异显著($p < 0.05$); W 为灌溉水平, N 为施氮量; * 表示 $p < 0.01$, * 表示 $p < 0.05$, ns 表示不显著。下同。

图 2 不同处理下小麦开花期 0~20 cm 土层土壤氮代谢酶活性

Fig.2 Soil nitrogen metabolism enzyme activity in the 0~20 cm soil layer at wheat anthesis stage under different treatments

2.2 水氮运筹对植株氮素积累与转运的影响

由表 3 可知, 灌溉水平和施氮量对小麦植株氮素积累量、氮素转运量和籽粒氮素积累量均具有显著影响, 且互作效应达到极显著水平($p < 0.01$)。同一灌溉水平下, 小麦植株氮素积累量、氮素转运量和籽粒氮素积累量均表现为随施氮量增加呈增加趋势。相同施氮量下, 开花期植株氮素积累量、氮素转运量和籽粒氮素积累量均表现为 $W2 > W3 > W1$, 成熟期植株氮素积累量表现为 $W3 > W2 > W1$, 氮素转运量对籽粒贡献率表现为 $W3$ 显著低于其他处理。与 $W3N2$ 和

$W3N3$ 处理相比, $W2N2$ 处理籽粒氮素积累量 2 年平均分别显著提高 9.59% 和 2.96%, 植株氮素转运量分别提高 12.43% 和 5.00%, 成熟期营养器官氮素积累量分别降低 10.23% 和 18.36%。与 $W2N3$ 处理相比, $W2N2$ 处理成熟期营养器官氮素积累量 2 年平均分别显著降低 12.59%。表明 $W2N2$ 处理能够显著提高小麦植株氮素转运量, 降低成熟期营养器官氮素的滞留, 从而显著提高小麦籽粒氮素积累量。

2.3 水氮运筹对小麦氮素营养指数的影响

由图 3 可知, 灌溉水平和施氮量对小麦开花期和成

熟期氮素营养指数均具有显著影响,且水氮互作效应达到极显著水平($p<0.01$)。同一灌溉水平下,小麦开花期和成熟期氮素营养指数均随施氮量增加而升高。W1 灌溉水平下,小麦开花期和成熟期氮素营养指数均 <1 ,表明在灌溉水平较低条件下,开花期和成熟期小麦均处于氮素亏缺状态。相同施氮量下,小麦开花期和成熟期氮素营养指数均表现为 $W2>W3>W1$ 。W2N2、W2N3 和 W3N3 处理小麦开花期氮素营养指数 2 年平均值分别为 0.99、1.03、0.99,成熟期分别为 1.01、1.05、1.02,能够满足小麦开花期和成熟期的氮素需求。在本试验条件下,W2N2 处理能够满足小麦开花期和成熟期氮素需求的最优水氮运筹方式。

表 3 不同处理下小麦植株氮素积累转运及其对籽粒贡献率

Table 3 Nitrogen accumulation and translocation of wheat plant and its contribution rate to grain under different treatments							
年份	主处理	副处理	营养器官氮素积累量/(kg·hm ⁻²)		籽粒氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	营养器官氮素	
			开花期	成熟期		转运量/ (kg·hm ⁻²)	转运量对籽粒的 贡献率/%
2022—2023	W1	N0	128.53±0.56g	48.09±0.66f	117.22±0.81h	80.44±0.29f	68.62±0.62f
		N1	183.90±1.15e	52.37±0.46e	177.27±2.34f	130.53±1.16d	73.63±1.28b
		N2	199.23±0.40d	55.08±0.54d	194.41±4.27d	144.16±0.19c	74.15±0.58a
		N3	215.54±1.55c	62.93±0.74b	204.42±3.50c	152.61±1.76b	74.65±0.42a
	W2	N0	138.78±0.98f	50.87±0.58e	125.55±1.54g	87.91±1.06e	70.02±0.33ef
		N1	198.93±0.80d	58.09±0.51cd	196.19±2.90d	140.84±0.39cd	71.79±1.08d
		N2	229.19±3.33b	60.84±0.84c	227.16±3.71a	168.35±9.53ab	74.11±0.53a
		N3	240.59±2.86a	67.11±0.54b	232.69±4.09a	173.48±3.95a	74.35±1.10a
	W3	N0	142.25±1.87f	51.60±0.42e	131.20±2.24g	90.65±1.46e	69.09±0.13f
		N1	193.09±2.51d	60.26±0.45c	188.47±1.68e	132.83±2.52d	70.48±0.72e
		N2	213.97±2.83c	66.19±0.53b	204.02±2.41c	147.78±1.34c	72.43±0.31bc
		N3	226.72±2.40b	70.65±0.89a	215.98±1.63b	156.06±2.56b	72.26±0.83c
2023—2024	W1	N0	130.84±1.02h	49.83±1.05f	117.25±0.20i	81.01±0.76j	69.09±0.54d
		N1	182.93±2.48f	55.27±0.39e	175.81±1.67g	127.66±2.11h	72.61±0.57c
		N2	207.21±1.65d	59.37±0.52d	196.43±2.14d	147.84±1.62e	75.26±0.13a
		N3	219.41±1.54c	62.79±0.38c	209.64±0.85c	156.62±1.26c	74.71±0.32ab
	W2	N0	136.41±2.05g	50.37±0.48f	122.58±1.90h	86.04±2.29i	70.19±1.23d
		N1	198.69±2.34e	58.92±0.61d	192.04±1.17e	139.77±2.23f	72.78±0.86c
		N2	231.09±2.89b	62.14±0.95c	227.09±4.83ab	168.95±2.57ab	74.39±1.17ab
		N3	243.47±3.23a	70.98±0.24b	232.43±3.97a	172.49±2.98a	74.21±1.50a
	W3	N0	139.49±1.97g	50.87±0.57f	125.92±1.73h	88.62±1.96i	70.38±2.32d
		N1	195.62±2.26e	63.65±0.61c	183.91±2.43f	131.97±1.66g	71.76±1.36cd
		N2	221.61±2.11c	69.37±0.80b	210.49±1.23c	152.23±1.98d	72.32±0.53c
		N3	240.08±0.96a	74.91±0.57a	225.19±2.44b	165.17±1.29b	73.34±1.04bc
W		* *	* *	* *	* *	* *	
N		* *	* *	* *	* *	* *	
W * N		* *	* *	* *	* *	* *	

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示同一生长季不同处理间差异显著($p<0.05$);W 为灌溉水平,N 为施氮量;* 表示 $p<0.05$,* * 表示 $p<0.01$;ns 表示差异不显著。下同。

2.4 水氮运筹对小麦成熟期土壤硝态氮残留量的影响

由图 4 可知,灌溉水平和施氮量对小麦成熟期 0~200 cm 土层土壤硝态氮残留量影响显著($p<0.01$),但二者互作效应未达到显著水平。同一灌溉水平下,增加施氮量显著提高小麦成熟期 0~60 cm 土层土壤硝态氮残留量。60~120 cm 土层土壤硝态

氮残留量表现为各施氮处理间无显著差异,显著高于 N0 处理。相同施氮量下,0~60 cm 土层土壤硝态氮残留量表现为 $W1>W2>W3$,60~120 cm 土层土壤硝态氮残留量表现为 W3 显著高于其他处理。表明适当降低水氮投入能够显著降低 60~120 cm 土层硝态氮残留量,延缓硝态氮向深层土壤的迁移,从而降

低土壤氮素淋失风险。

2.5 水氮运筹对小麦籽粒产量和水氮利用效率的影响

由表 4 可知,灌溉水平和施氮量对籽粒产量、氮肥农学效率、氮肥利用率和灌溉水利用效率均具有显著影响,且互作效应达到极显著水平($p<0.01$)。同一灌溉水平下,籽粒产量随施氮量增加呈增加趋势,氮肥农学效率表现为 $N2>N3>N1$,氮肥利用率和灌溉水利用效率均表现为 $N2$ 和 $N3$ 处理无显著差异,显著高于 $N1$ 处理。相同施氮量下,籽粒产量表现为 $W2$ 和 $W3$ 处理显著高于 $W1$ 处理,氮肥农学效率和氮肥利用率均表现

为 $W2$ 处理显著高于其他处理,灌溉水利用效率表现为 $W1>W2>W3$ 。相较于 $W2N2$ 处理, $W2N3$ 、 $W3N2$ 和 $W3N3$ 处理氮肥农学效率 2 年平均值分别降低 13.02%、14.25% 和 26.34%,氮肥利用率分别降低 9.77%、23.64% 和 23.46%,灌溉水利用效率分别降低 2.88%、37.32% 和 38.10%,籽粒产量无显著差异。综上所述, $W2N2$ 处理显著提高小麦籽粒产量、氮肥农学效率、氮肥利用率和灌溉水利用效率。继续增加水氮投入对小麦籽粒产量无显著提高作用,并造成水氮利用效率的显著下降。

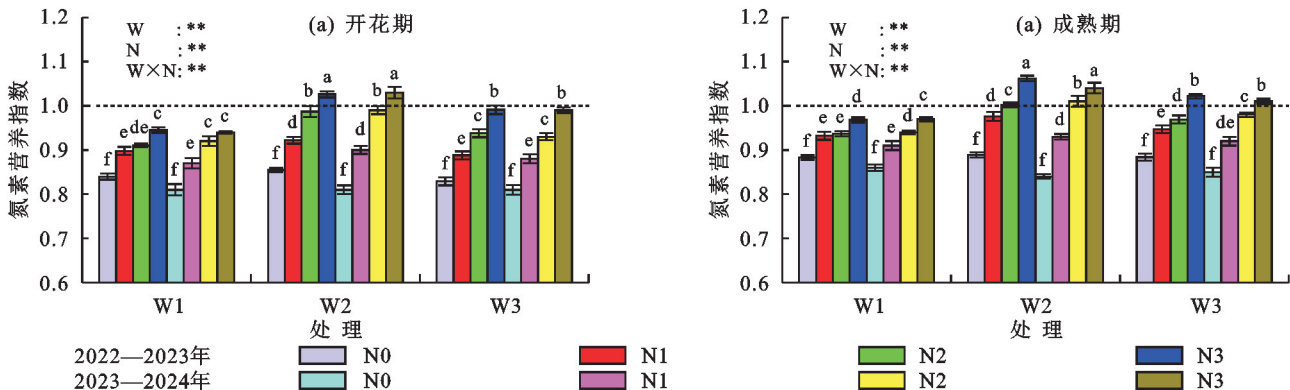


图 3 不同处理下小麦开花期和成熟期氮素营养指数

Fig.3 Nitrogen nutrition index of wheat at anthesis and maturity stages under different treatments

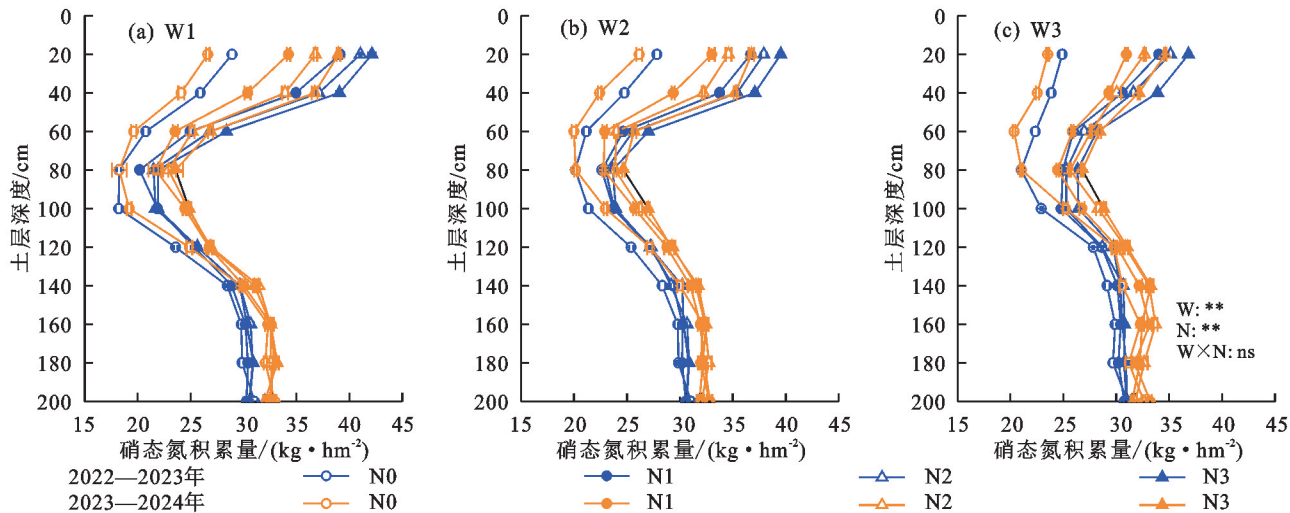


图 4 不同处理下小麦成熟期 0~200 cm 土层土壤硝态氮残留量

Fig.4 The residual amount of soil nitrate-nitrogen in the 0~200 cm soil layer at wheat maturity stage under different treatments

2.6 水氮运筹模式的综合评价与通径分析

通过优劣解距离法对水氮运筹模式进行综合评价分析,综合考虑小麦籽粒产量、水氮利用效率、土壤氮代谢酶活性、土壤硝态氮残留量和植株氮素利用等方面,得出本试验条件下的最优水氮运筹模式。由表 5 可知, $W2N2$ 处理具有最低的正理想解距离和最高的负理想解距离,从而获得最高的综合得分指数,为本试验条件下的最佳水氮运筹模式。通过水氮因子对籽粒产量的通径分析结果(表 6)可知,水氮因子与籽粒产量的简单相关系数均为正值,表明灌溉

水平、施氮量与籽粒产量间均呈显著正相关。施氮量对籽粒产量的直接通径系数、间接通径系数和决策系数均高于灌溉水平,表明施氮量对小麦籽粒产量的促进作用更大。

3 讨论

3.1 水氮运筹对土壤氮代谢和硝态氮残留的影响

土壤氮代谢相关酶活性对环境变化十分敏感,可作为反映土壤养分循环状况的重要指标^[12]。有研究^[13]表明,适当提高灌溉水平能够显著提高土壤脲

酶和蛋白酶活性。本研究表明,土壤脲酶和蛋白酶活性均随灌溉水平的增加呈先上升后下降趋势,而硝酸还原酶活性表现为随灌溉水平的增加而增加。究其原因,可能是反硝化相关微生物多为厌氧生物,高灌溉水平为其提供厌氧环境,从而提高硝酸还原酶活性。另有研究^[14]表明,土壤酶活性与土壤全氮质量分数呈显著正相关,土壤酶活性随施氮量的增加显著增加。

表 4 不同处理下小麦籽粒产量和水氮利用效率

Table 4 Grain yield, water-and nitrogen-use efficiency of wheat under different treatments						
年份	主处理	副处理	籽粒产量/ (kg · hm ⁻²)	氮肥农学效率/ (kg · kg ⁻¹)	氮肥利用率/ (kg · kg ⁻¹)	灌溉水利用效率/ (kg · hm ⁻² · m ⁻³)
2022—2023	W1	N0	4 883.46±62.87g	—	—	11.64±0.15c
		N1	7 108.34±101.09e	14.83±0.08e	40.03±0.56e	17.42±0.22b
		N2	8 148.62±64.20d	18.14±0.26b	42.88±0.07d	18.29±0.04a
		N3	8 471.59±126.61c	17.09±0.13c	41.52±0.47de	17.57±0.23ab
	W2	N0	5 425.36±73.01f	—	—	7.74±0.11f
		N1	7 853.64±115.17d	16.19±0.18d	47.09±0.73c	11.49±0.16c
		N2	9 103.53±128.02a	20.43±0.29a	56.45±0.29a	12.67±0.01b
		N3	9 276.31±14.84a	18.34±0.09b	51.02±0.73b	12.12±0.14b
	W3	N0	5 643.17±56.57f	—	—	5.91±0.01g
		N1	7 896.41±60.26d	15.02±0.17e	38.18±0.58f	8.24±0.04e
		N2	8 903.58±133.07b	18.11±0.25b	40.46±0.66e	8.86±0.04d
		N3	9 017.26±130.45ab	16.07±0.21d	40.37±0.51e	8.63±0.06d
2023—2024	W1	N0	5 047.18±71.43g	—	—	6.17±0.04f
		N1	7 619.21±84.68e	17.15±0.12c	39.04±0.28e	9.63±0.10b
		N2	8 479.89±115.92d	19.07±0.09b	43.99±0.49d	10.43±0.05a
		N3	8 775.69±79.74c	17.75±0.17c	44.00±0.35d	10.37±0.14a
	W2	N0	5 669.03±45.35f	—	—	5.42±0.06g
		N1	8 721.80±48.34c	20.35±0.26b	46.31±0.61c	8.43±0.08d
		N2	9 728.84±133.00a	22.55±0.34a	58.06±0.75a	9.15±0.11c
		N3	9 804.48±113.93a	19.69±0.20b	52.31±0.34b	9.09±0.13c
	W3	N0	5 792.40±71.94f	—	—	4.44±0.06h
		N1	8 179.49±49.40d	15.91±0.21d	38.66±0.60e	6.34±0.07f
		N2	9 304.29±80.51b	19.51±0.27b	46.98±0.53c	7.03±0.10e
		N3	9 560.85±107.90ab	17.95±0.08c	47.27±0.28c	7.17±0.10e
W		* *	* *	* *	* *	
N		* *	* *	* *	* *	
W * N		* *	* *	* *	* *	

表 5 不同水氮运筹模式的综合评价
Table 5 Comprehensive evaluation of different water and nitrogen management modes

处理	正理想解 距离(D+)	负理想解 距离(D-)	综合得分 指数	排序
W1N1	0.694	0.630	0.476	6
W1N2	0.472	0.644	0.577	3
W1N3	0.490	0.608	0.554	4
W2N1	0.526	0.554	0.513	5
W2N2	0.340	0.793	0.700	1
W2N3	0.518	0.731	0.585	2
W3N1	0.812	0.417	0.339	9
W3N2	0.623	0.448	0.418	7
W3N3	0.701	0.469	0.401	8

表 6 水氮因子与籽粒产量的通径系数与决策系数
Table 6 Path coefficients and decision coefficients of water and nitrogen factors and grain yield

因子	简单相关 系数	直接通径 系数	间接通径系数		决策 系数
			W→Y	N→Y	
W	0.573	0.513	—	0.049	0.313
N	0.687	0.638	0.061	—	0.485

注:Y 为籽粒产量。

本研究表明,土壤氮代谢相关酶活性均表现为随施氮量的增加呈增加趋势,但施氮量超过 180 kg/hm²,继续增施氮肥对土壤脲酶和蛋白酶活性无显著提升作用。原因可能是,过量施氮降低土壤 pH,进而抑制土壤酶活性,但其作用机理仍需进一步探究。

土壤硝态氮是作物主要吸收利用的氮素形态,不适宜的水氮运筹易增加其淋溶风险^[15]。有研究^[16]表明,随灌溉量的增加,深层土壤硝态氮残留量显著增加。本研究表明,土壤相对含水量补灌至 75% 显著减少 60~120 cm 土层土壤硝态氮残留量,降低氮素向深层土壤淋溶的风险。另有研究^[17]表明,随施氮量增加,土壤硝态氮淋溶深度和淋溶量均呈增加趋势。本研究表明,土壤硝态氮残留量随施氮量的增加呈增加趋势。因此,通过优化水氮运筹能够减缓土壤硝态氮向深层的迁移,降低氮素淋失风险,从而达到节水减氮、高产高效的目的。

3.2 水氮运筹对小麦氮素积累与转运的影响

小麦植株氮素积累、氮素转运与籽粒产量密切相关,是产量形成的重要基础,通常作为反映植株营养生长状况的重要指标^[18]。有研究^[19]表明,增加灌溉量能够促进小麦营养器官氮素的积累和转运,提高籽粒氮素积累量。有研究^[20]表明,适宜限水条件不能造成小麦植株氮素积累量的降低,并通过提高氮素收获指数来增加籽粒氮素积累量。本研究表明,土壤相对含水量补灌至 75% 显著提高植株氮素积累量、氮素转运量和籽粒氮素积累量。继续增加灌溉水平导致营养器官氮素转运量和籽粒氮素积累量的显著降低。究其原因,可能是高灌溉水平降低小麦植株的氮代谢酶活性,进而影响营养器官氮素积累与转运。另有研究^[21]表明,在水分亏缺条件下,增施氮肥能够缓解干旱胁迫对小麦氮素吸收造成的不利影响,从而提高小麦籽粒氮素积累量。适宜土壤水分状况下,增施氮肥能够促进植株氮素积累和转运,但在 195 kg/hm² 施氮量条件下,继续增加氮肥投入将阻碍营养器官氮素向小麦籽粒的转运,从而降低籽粒氮素积累量^[22]。本研究表明,小麦开花期植株氮素积累量、氮素转运量和籽粒氮素积累量均表现为随施氮量的增加呈增加趋势,但增施氮肥也导致成熟期营养器官氮素残留量的增加。可能是高施氮量下小麦氮肥利用效率降低的原因之一^[23]。

3.3 水氮运筹对籽粒产量和水氮利用效率的影响

小麦产量和水氮利用效率易受水氮运筹、地力水平和耕作方式等因素的影响,目前,水氮投入是生产中效果显著且最易控制的栽培措施之一^[24]。有研究^[25]表明,轻度干旱胁迫对小麦籽粒产量无显著影响,且能够显著提高小麦水分利用效率。但随着灌溉水平的继续降低,光合同化产物转运受阻,籽粒产量显著降低,从而导致水氮利用效率显著下降。本研究表明,灌溉水利用效率随灌溉水平的降低而显著增加,究其

原因,可能与水分亏缺条件下叶片气孔关闭,蒸腾速率下降有关^[24]。但低灌溉水平下土壤氮素代谢和小麦氮素利用能力显著下降,从而导致籽粒产量的显著降低。另有研究^[26]表明,高施氮量条件下,小麦产量和水分利用效率均高于低施氮量处理,但易造成氮肥利用效率的显著降低。本研究表明,随施氮量的增加小麦籽粒产量呈增加趋势,氮肥农学效率、氮肥利用率和灌溉水利用效率表现为先增后降趋势。施氮量对籽粒产量的影响符合报酬递减规律,在施氮量 180 kg/hm² 条件下继续增施氮肥,对籽粒产量无显著提升作用,但造成水氮利用效率的显著降低。由通径分析结果可知,水氮因子均为小麦增产的限制因子,但在本试验条件下,施氮量对籽粒产量的促进作用更大。综合考虑籽粒产量和水氮利用效率等指标,对水氮运筹模式进行综合评价分析,W2N2 处理是本试验条件下最优的水氮运筹方式。

4 结论

小麦拔节期和开花期 0~40 cm 土层土壤相对水分体积分数均补灌至 75%,协同施氮量 180 kg/hm² 显著提高土壤脲酶和蛋白酶活性,抑制硝酸还原酶活性,能够维持小麦开花期和成熟期的氮素营养指数处于最佳值,并显著提高营养器官氮素积累量、氮素转运量和籽粒氮素积累量。此外,该水氮运筹方式显著降低 60~120 cm 土层土壤硝态氮残留量,降低土壤氮素淋溶风险,同时获得较高籽粒产量和水氮利用效率。因此,在小麦拔节期和开花期 0~40 cm 土层土壤相对水分体积分数均补灌至 75%,协同施氮量 180 kg/hm² 是本试验条件下最优水氮运筹方式。

参考文献:

- [1] 杨毅轩,陈应枝,唐芃,等.播种方式对黄淮海麦区西部冬小麦氮素利用与产量形成的影响[J].应用生态学报,2023,34(6):1572-1582.
YANG Y X, CHEN Y Z, TANG P, et al. Effects of sowing patterns on nitrogen utilization and yield formation of winter wheat in the Western Huang-Huai-Hai Region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(6): 1572-1582.
- [2] 张刁亮,杨昭,胡发龙,等.复种绿肥在不同灌水水平下对小麦籽粒品质和产量的影响[J].作物学报,2023,49(9):2572-2581.
ZHANG D L, YANG Z, HU F L, et al. Effects of multiple cropping green manure on grain quality and yield of wheat with different irrigation levels[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(9): 2572-2581.
- [3] 韩守威,司纪升,余维宝,等.山东省冬小麦产量差与氮肥利用效率差形成机理解析[J].中国农业科学,2022,55

- (16):3110-3122.
- HAN S W, SI J S, YU W B, et al. Mechanisms analysis on yield gap and nitrogen use efficiency gap of winter wheat in Shandong Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(16):3110-3122.
- [4] 刘振, 宁堂原. 黄淮海平原灌区节水高效耕作制度构建[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(3):31-40.
- LIU Z, NING T Y. Construction of water-saving and efficient farming system in irrigation area of the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3):31-40.
- [5] 王永亮, 胥子航, 李申, 等. 秸秆还田与花后灌溉提高春玉米产量及水氮利用效率[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(18):3599-3614.
- WANG Y L, XU Z H, LI S, et al. Straw returning and post-silkin irrigating improve the grain yield and utilization of water and nitrogen of spring maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(18):3599-3614.
- [6] GUO Z J, ZHANG Y L, ZHAO J Y, et al. Nitrogen use by winter wheat and changes in soil nitrate nitrogen levels with supplemental irrigation based on measurement of moisture content in various soil layers[J]. *Field Crops Research*, 2014, 164:117-125.
- [7] GUO Y, YIN W, HU F L, et al. Reduced irrigation and nitrogen coupled with no-tillage and plastic mulching increase wheat yield in maize-wheat rotation in an arid region[J]. *Field Crops Research*, 2019, 243:e107615.
- [8] 蒋龙刚, 黄明, 宋庆赞, 等. 基于土壤有机质含量推荐的旱地冬小麦施氮量研究[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(10):2020-2033.
- JIANG L G, HUANG M, SOGN Q Y, et al. Research on nitrogen fertilizer application recommended method based on soil organic matter in dryland wheat production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(10):2020-2033.
- [9] SHEN H Z, GAO Y H, SUN K X, et al. Effects of differential irrigation and nitrogen reduction replacement on winter wheat yield and water productivity and nitrogen use efficiency [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, (282):e108289.
- [10] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(12):2423-2434.
- JIAO Y P, QI P, WANG X J, et al. Effects of different nitrogen application rates on soil organic nitrogen components and enzyme activities in farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(12):2423-2434.
- [11] 李红星, 高飞, 任佰朝, 等. 夏玉米秸秆还田量和施氮量对冬小麦产量和氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(7):1260-1270.
- LI H X, GAO F, REN B Z, et al. Effects of straw incorporation and nitrogen application rate on winter wheat yield and nitrogen utilization [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7):1260-1270.
- [12] 高丽超, 郑文魁, 程运龙, 等. 长期施用控释掺混尿素对麦田土壤酶活性及养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2):343-350.
- GAO L C, ZHENG W K, CHENG Y L, et al. Effects of long-term application of blended controlled-release urea on soil enzyme activities and nutrients in stubble wheat fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2):343-350.
- [13] CHEN N, LI X Y, SHI H B, et al. Effect of biodegradable film mulching on crop yield, soil microbial and enzymatic activities, and optimal levels of irrigation and nitrogen fertilizer for the Zea mays crops in arid region[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 776:e145970.
- [14] 高丽超, 郑文魁, 郭新送, 等. 控释肥配施玉米秸秆对麦季土壤酶活性及养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6):356-363.
- GAO L C, ZHEGN W K, GUO X S, et al. Effects of controlled release fertilizer combined with maize straw on soil enzyme activities and nutrients in wheat season [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6):356-363.
- [15] 雒文鹤, 师祖姣, 王旭敏, 等. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2020, 46(06):924-936.
- LUO W H, SHI Z J, WANG X M, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on soil nitrate nitrogen distribution, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(6):924-936.
- [16] 万文亮, 郭鹏飞, 胡语妍, 等. 调亏灌溉对新疆滴灌春小麦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6):166-174.
- WAN W L, GUO P F, HU Y Y, et al. Distribution and yield of spring wheat under drip irrigation in Xinjiang [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6):166-174.
- [17] 张嫚, 周苏玫, 杨习文, 等. 减氮适墒对冬小麦土壤硝态氮分布和氮素吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20):3885-3897.
- ZHANG M, ZHOU S M, YANG X W, et al. Effects of nitrogen-reducing and suitable soil moisture on nitrate nitrogen distribution in soil, nitrogen absorption and utilization of winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20):3885-3897.

- [18] ZHANG G X, LIU S J, DONG Y C, et al. A nitrogen fertilizer strategy for simultaneously increasing wheat grain yield and protein content: Mixed application of controlled-release urea and normal urea[J]. *Field Crops Research*, 2022, 277: e108405.
- [19] 马瑞琦, 王德梅, 陶志强, 等. 不同筋型小麦干物质和氮素积累对追施氮量的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(4): 622-631.
- MA R Q, WANG D M, TAO Z Q. Response of dry matter and nitrogen accumulation of wheats with different gluten contents to topdressing rate of nitrogen fertilizer [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(4): 622-631.
- [20] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮互作对冬小麦氮素吸收分配及土壤硝态氮积累的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 138-142.
- LI L, HONG J P, WANG H T, et al. Effects of nitrogen and irrigation interaction on nitrogen uptake and distribution in winter wheat and nitrate accumulation in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 138-142.
- [21] 崔亚坤, 王妮妮, 田中伟, 等. 分蘖和拔节期干旱对小麦植株氮素积累转运的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(3): 322-328.
- CUI Y K, WANG N N, TIAN Z W, et al. Effect of water deficit during tillering and jointing stages on nitrogen accumulation and translocation in winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(3): 322-328.
- [22] 杨梅, 李雪萌, 秦保平, 等. 水氮运筹对强筋小麦干物质转运与籽粒产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(6): 770-779.
- YANG M, LI X M, QIN B P, et al. Effects of water and nitrogen management on matter translocation and grain yield of strong gluten wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(6): 770-779.
- [23] LI Y, HUANG G, CHEN Z, et al. Effects of irrigation and fertilization on grain yield, water and nitrogen dynamics and their use efficiency of spring wheat farmland in an arid agricultural watershed of Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 260: e107277.
- [24] 唐锐, 韩宜秀, 易树生, 等. 不同水氮组合对冬小麦产量及水氮利用效率的调控效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(10): 1944-1955.
- TANG R, HAN Y X, YI S S, et al. Optimal water and nitrogen combination for winter wheat yield and water-nitrogen efficiency in Guanzhong area of Shaanxi[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(10): 1944-1955.
- [25] 尹豪杰, 王荣荣, 蒋桂英, 等. 春小麦光合生理和产量对干旱-复水的响应[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 134-144.
- YIN H J, WANG R R, JIANG G Y, et al. Response of photosynthetic physiology and yield of spring wheat to drought-rewatering[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 134-144.
- [26] 高翠民, 杨永辉, 韩伟锋, 等. 水氮运筹对滴灌冬小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(7): 885-893.
- GAO C M, YANG Y H, HAN W F, et al. Effect of water and nitrogen management on yield, and water and nitrogen use efficiency of winter wheat under drip irrigation[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(7): 885-893.